

回転する物体よりの熱伝達について

泉 亮 太 郎

工業短期大学部機械科

緒 論

回転する物体が静止空気中または強制気流中にある場合の熱伝達現象は化学機械装置および内燃機関などの熱交換器の場合の基礎的問題として重要である。また、電動機などの場合の様に回転軸よりの放熱が問題となる場合にも考慮しなければならない現象である。

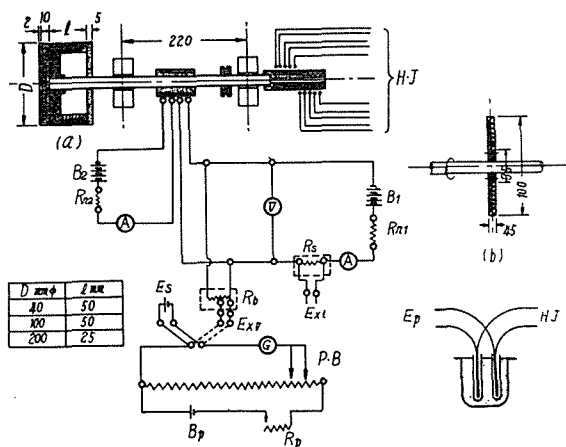
筆者は先に、回転体として無限円柱、円板および棒の場合につけて実験を行いこれらの結果を発表したが、^{(1),(2),(3)} その後この問題が各方面で取上げられ当時はわずかに C. Wagner⁽⁴⁾ による回転円板の場合の理論解があるのみであったが最近、回転円柱については G. A. Etemad⁽⁵⁾ および D. Dropkin and A. Carmi⁽⁶⁾ の論文が発表され、また回転円板については K. L. Young⁽⁷⁾ が実験結果を発表している。

いずれも静止空気中における場合の研究であり、これらの結果と筆者の結果とを比較する意味でここにこれらの問題を取りあげてみた。

なお、強制気流中における結果は筆者論文を参考にされたい^{(8),(9),(10)}。

1. 実験装置とその方法。

第1図は回転円板の場合の実験装置であり、円板の直径 $D = 40, 100$ および $200\text{mm}\phi$



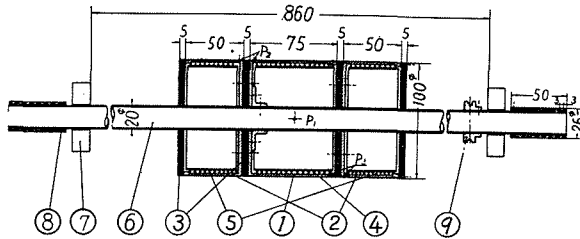
第 1 図

について温度と回転数を変えて実験を行った。円板は黄銅板を用い(厚さ 2mm) 温度は電位差計により表面三個所側面二個所を測定した。加熱は $0.5\text{mm}\phi$ の Ni-Cr 線により、直流又は交流の安定電流とした。銅-コンスタンタンの熱電対 ($0.15\text{mm}\phi$) は回転軸内を通り円環および銅接片により電位差計に導いた。この場合、回転数が大になると回転接触のための誤差を生ずるがこの注意事項については宮坂氏⁽¹¹⁾ の論文を参照されたい。

回転数は変速電動機 ($1/2\text{HP}$) により $n=0\sim 1,500\text{rpm}$ の範囲であった。自然対流の場合には外部の影響を敏感に受け易いので、実験室を約 2.20m 平方の仕切りを行って測定には注意を払った。

第2図は回転円柱の場合の詳細図であり無限円柱とするため、 5mm 厚みのベークライト板をへて左右に熱平衡用円柱を配置してある。円板の場合は l の部分がこれに相当する。

供試円柱は直径 $D = 40, 100$ および $200\text{mm}\phi$ の三種であり、黄銅表面に五個所熱電対



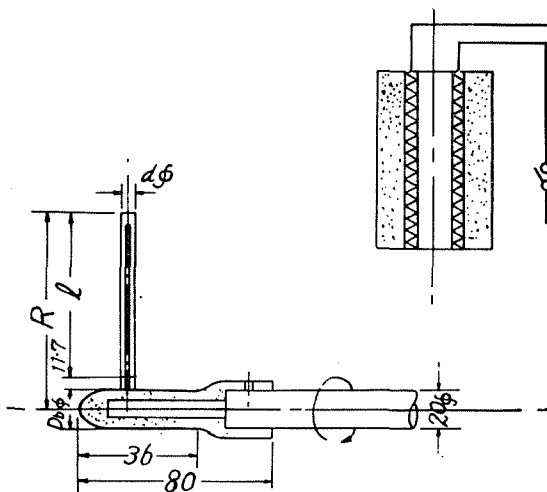
第 2 図

$$\alpha_m = (0.86VI - q_s - q_p) / F \cdot \Delta\vartheta - \alpha_r \quad (1)$$

ここに、 q_s kcal/hr は側面に流出入する熱量、 q_p は円板の場合端面より放出される熱量、 $F\text{m}^2$ は表面積、 $\Delta\vartheta^\circ\text{C}$ は温度差および α_r kcal/ $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ は輻射による補正量である。

表面の平均温度と室温との温度差 $\Delta\vartheta^\circ\text{C}$ は $10\sim 100^\circ\text{C}$ の範囲であり、表面温度の平均温度との偏倚は $D=200\text{mm}\phi$ の最高の場合で約 2°C 迄であった。

輻射の影響は低温度のため少く、実測により輻射係数は $C \cong 0.3$ kcal/ $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{K}^4$ であり α_r の補正值は 0.7 kcal/ $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ を超えることはなかった。



$d\text{mm}$	$l\text{mm}$	$D_0\text{mm}$	材質	$G\gamma^\circ$
10	30.8	30	黄銅	15.10
10	61.0	30	"	15.82
10	120.0	30	銅	32.80
6	73.0	30	"	10.72
6	77.5	20	"	11.30

第 3 図

$$\alpha_m = \frac{C\gamma V}{F} \left(-d\vartheta/dt \right) / \vartheta_o - \vartheta_\infty - \alpha_r \quad (2)$$

で表わされる。ここに、 $\vartheta_o^\circ\text{C}$ は平均棒温度、 $\vartheta_\infty^\circ\text{C}$ は空気の方温度をあらわす。

冷却時間は無回転の場合で $15\sim 20$ 分、回転した場合 $1.3\sim 10$ 分程度で定常温度となる。室温は 5°C 前後であった。

を挿入してある。円柱および円板の場合の実験方法は熱量を与えた場合の実験であり、いま V ボルト I アムペア をそれぞれ加えた電圧および電流とすれば求める表面伝率 α_m kcal/ $\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ は次の如く表せる。

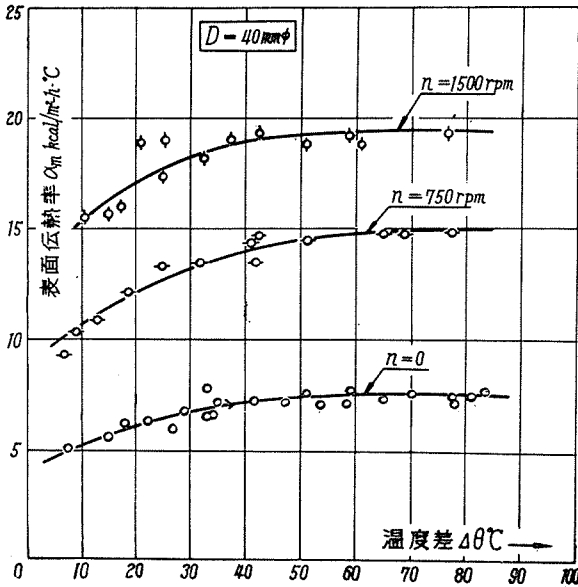
第3図は回転棒の場合であり、棒径 $d = 6\sim 10\text{mm}\phi$ の銅又は黄銅棒の3点に熱電対を挿入、ベークライト回転軸をへて円環に接合してある。この場合は冷却法により実験を行い、回転軸部分への熱出入量は冷却曲線により補正を行った。

加熱は簡易移動電気炉により行い、温度差 100°C となった時に冷却をさせ、時間を測定した。

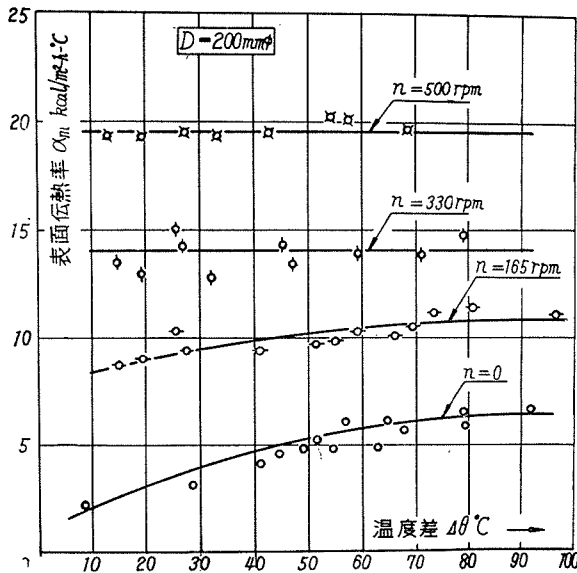
いま、棒の比熱、比重、容積表面および混度差をそれぞれ C kcal/kg $^\circ\text{C}$ 、 γ kg/ m^3 、 $V\text{m}^3$ $F\text{m}^2$ および $\Delta\vartheta^\circ\text{C} = \vartheta_o - \vartheta_\infty$ とすれば表面伝熱率は

2. 実験結果とその考察。

(a) 回転する無限円柱の場合。⁽¹⁾



第 4 図



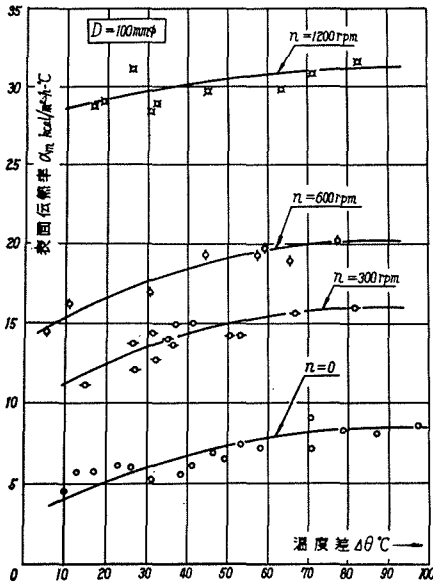
第 5 図

以上の方法により求めた結果を第4,5 および6 図にします。いずれの場合も温度差は $\Delta\theta = 0 \sim 100^\circ\text{C}$ の範囲であり、表面伝熱率 $\alpha_m \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ は $\Delta\theta^\circ\text{C}$ が増すとともに増加し高回転数では $\Delta\theta$ に関係のないほぼ一定の直線となる。このことは $n \text{ rpm}$ の増大とともに次第に強制対流領域に近づくことを意味する。無回転の時に比較して、 40 mm では $n = 750 \text{ rpm}$ で最高 2.07 倍、 $1,500 \text{ rpm}$ では 2.77 倍の増加割合となっている。また、 100 mm では 300 rpm で最高 1.95 倍、 600 rpm では 2.49 倍、 $1,200 \text{ rpm}$ では 3.80 倍の増加をしめし、さらに 200 mm の場合では $n = 165 \text{ rpm}$ で最高 1.57 倍、 300 および 550 rpm ではそれぞれ 2.0 および 2.78 倍の増加割合をしめしている。

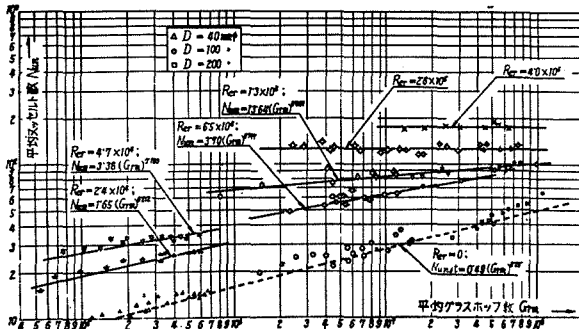
これらの図表を元にして対数図表上で平均ヌセルト数 $\text{Num} = \alpha_m D / \lambda$ とグラスホフ数 $\text{Grm} = D^3 \Delta\theta \beta g / \nu^2$ とで表わせば第7 図の如くなる。ただし、 $D \text{ m}$ は直径、 $\lambda \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ は空気の熱伝導率、 β は膨脹係数、 $\nu \text{ cm}^2/\text{s}$ は動粘性係数および $g \text{ m/h}^2$ は重力の加速度をあらわす。Mc Adams⁽¹²⁾ が静止円柱の場合、理論を元にして作った実験式 $\text{Num} = 0.49 \text{Grm}^{0.25}$

に対して、回転レイノルズ数 $\text{Rer} = 4\pi r^2 \omega / \nu$ (C.Wagner の流儀に従う) を変えることにより図のように変化する。すなわち、この図で Rer の低いところでは Numst ($\text{Rer} = 0$ の場合) に近い傾斜を有ち、 Rer の増加とともに傾斜に次第に少となり、 $\text{Rer} = 2.6 \times 10^5$ 以上の範囲では Grm の如何に拘らずほぼ一定の値をとる様になり、回転のために強制対

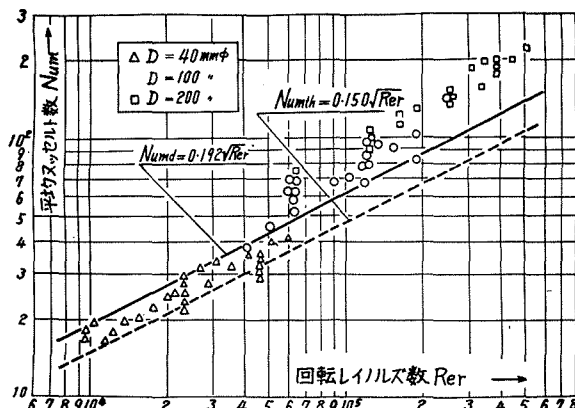
流となったことになる。この傾向は最近になって、G. A. Etemad によっても指摘された。⁽⁶⁾



第 6 図



第 7 図



第 8 図

C. Wagner は回転している場合の円板の表面伝熱率を Kármán の理論をもとにして求め、

$$\alpha_m = 0.339(\omega/\nu)^{1/2} \lambda \quad (3)$$

なる理論式を提唱している⁽⁴⁾。ただし、 ω は円板の角速度をあらわす。

これより、Num を求めれば

$$Num = \alpha_m D / \lambda = 0.191 Rer^{0.5} \quad (4)$$

ここに、 $Rer^{0.5} = 4\pi r^2 \omega / \nu$ で W. Schmidt によれば、 5×10^5 以下ではよく実験と一致するといわれる⁽¹³⁾。

筆者のポテンシャル流としての理論解は

$$Num = 0.15 Rer^{0.5} \quad (5)$$

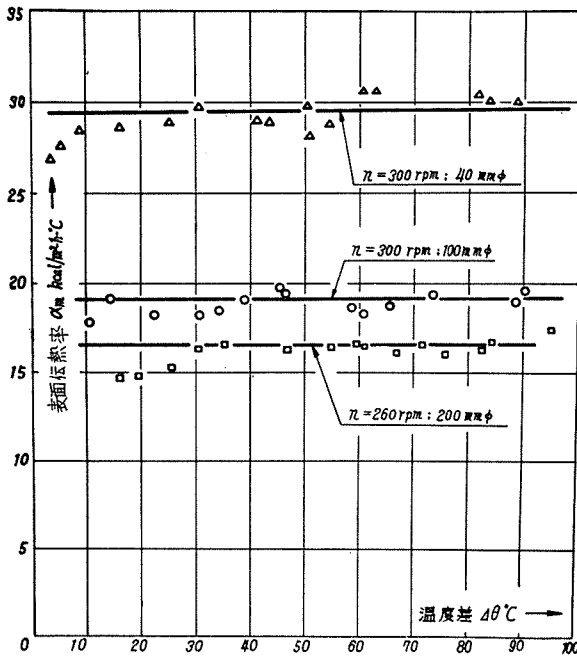
となり⁽¹⁴⁾、円板の理論値の方が約 1.27 倍大となっている。実験点との関係を第 8 図に示す。

Grm の影響が大で一本の直線で表すことは難しいが、Grm の等しいところでは第 7 図の様にはほぼ直線的であり、Rer の低いところでは、ほぼ $Rer^{0.5}$ に比例することが解る。Rer の大きいところでは $Rer^{0.6} \sim Rer^{0.7}$ に比例する直線となる。

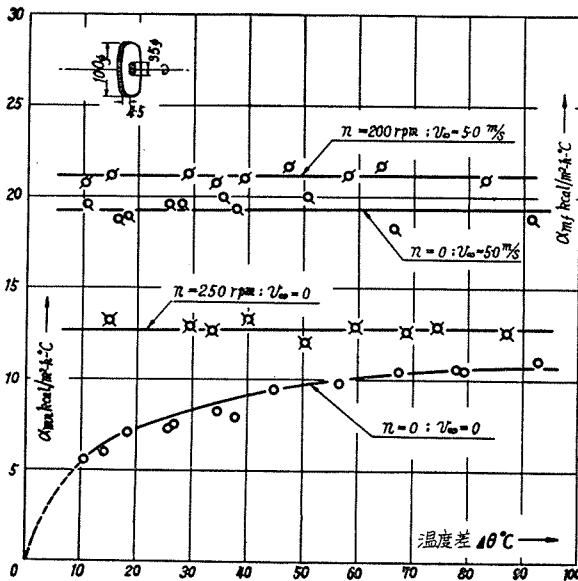
(b) 回転円板の場合。⁽²⁾

第 9 図は回転した場合の片面円板の場合の結果の一例でありいずれの場合も α_m は $\Delta\theta^\circ\text{C}$ が低いところでは降下の傾向にあるが、 $n=300\text{rpm}$ 程度の回転数ではほぼ $\Delta\theta^\circ\text{C}$ に無関係とみて差支ないようである。この場合の α_m の平均値と実験点との最大誤差は $\Delta\theta^\circ\text{C}=100^\circ\text{C}$ では 8.5~10% 程度であったが、この誤差は $\Delta\theta^\circ\text{C}$ が大となり、 $n\text{ rpm}$ が増せば減少する。

第 10 図は両側面が気流にさら



第 9 図



第 10 図

された場合の円板に対する実験結果であり、自然対流の場合の $n=0$, 250rpm の場合の値をしめしている。

この場合は外径 $100\text{mm}\phi$, 0.5mm 厚みの銅板を用い $35\text{mm}\phi$ のベークライト板により回転軸に固定した。実験値は第 9 図の場合よりも幾分低い値をしめしている。

以上の数多くの結果を用いて $\text{Num} = \alpha_m D / \nu$ に対し $\text{Rer} = 4\pi r^2 \omega / \nu$ で表わしたのが第 11 図である。

いずれの場合も $48^\circ\text{C} = 50 \pm 15^\circ\text{C}$ の範囲における実験であり、誤差は約 5% 以下と考えてよい。図で Num は Rer の増大とともに増加し、その傾向は

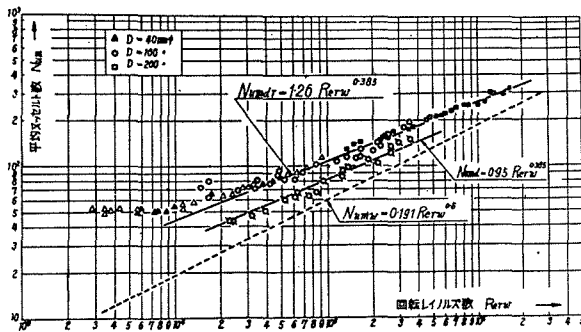
$$\text{Num} = 1.26 \text{Rer}^{0.385} \quad (6)$$

なる直線で表わされ、C. Wagner の理論値と異なる傾向をしめす。

すなわち、 Rer の小さいところでは理論値より著しく離れ、 Rer の大きいところでは次第に理論値に近づく。E. Schmidt は $\text{Rer} < 5 \times 10^5$ で成立つといっているが⁽¹³⁾、筆者の実験では Rer の大きいところでは理論値に近づくが、 $\text{Rer} < 2 \times 10^4$ ではほぼ一定の値となり、 Num には変化なく $\text{Rer} = 2 \times 10^4$ の近傍において自然対流領域と強制対流領域の遷移点があるように思われる。

C. Wagner の理論値より偏る原因としては、Wagner の理論値は無限円板すなわち、熱流は軸方向のみとし、切線方向には境界層厚みにそって均一であると仮定して求めたものであり、筆者の場合の有限長円板とは大分異なることおよび厚みがあるためと思われる。

遷移点のある理由としては、 $\text{Rer} \leq 1 \times 10^4$ では $\text{Nmm} \cong 50$ の一定値をしめしてい



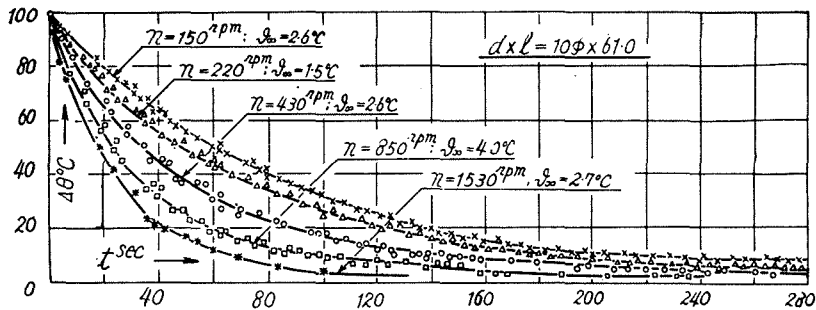
第 1 1 図

このことは円周よりの放熱を考え、円柱の場合の値が合成されたと考えればほぼ妥当であると考えられる。

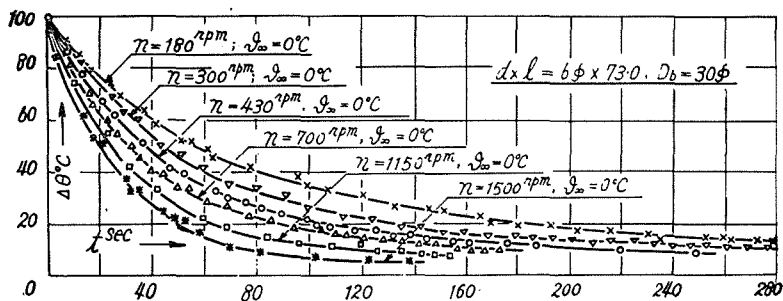
第(6)式の理論値との差異は最大 $Rer=5 \times 10^5$ では 53.5%, 5×10^4 では約93%となっている。

(c) 回転棒の場合。(3)

第12, 13図は回転棒に対する冷却曲線であり、横軸は冷却時間 t sec である。室温の変

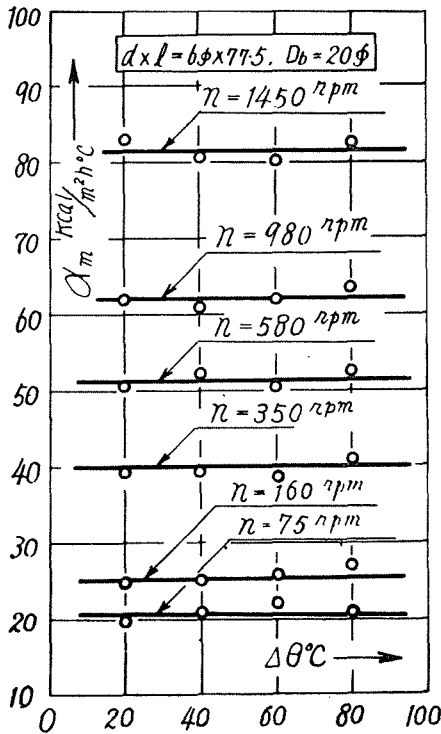


第 1 2 図

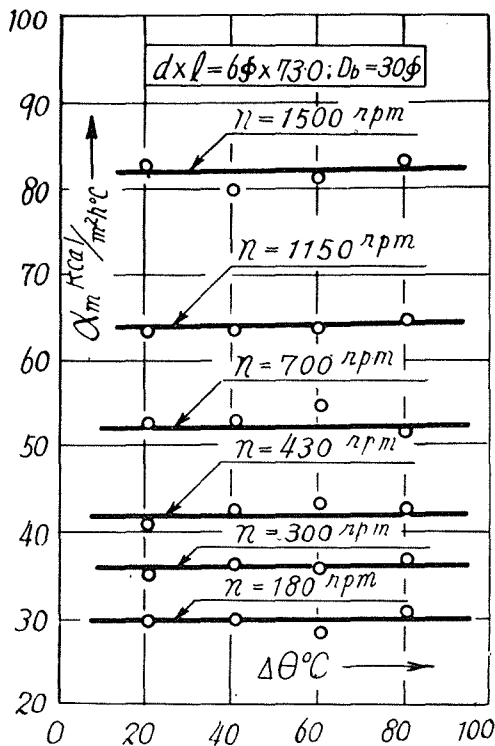


第 1 3 図

化はほとんどなく、実験中の変化は $0.05^\circ C$ 以内であり、回転数の変動は最高で $1,800rpm \pm 10rpm$ 程度であった。

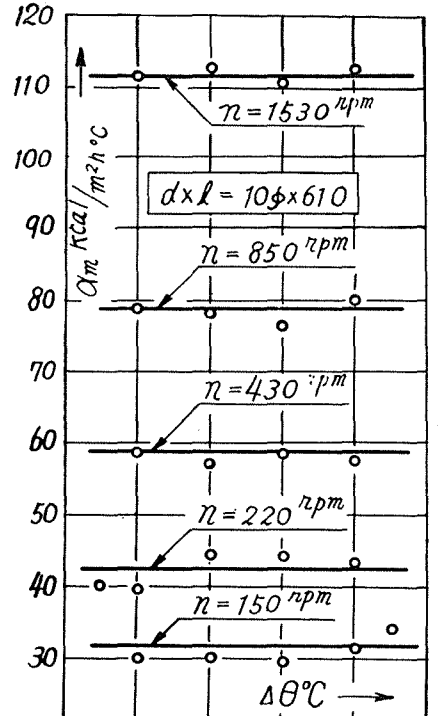


第 14 図



第 16 図

これらの曲線から勾配を求め (2) 式により α_m を求めたのが第14, 15 および16図である。



第 15 図

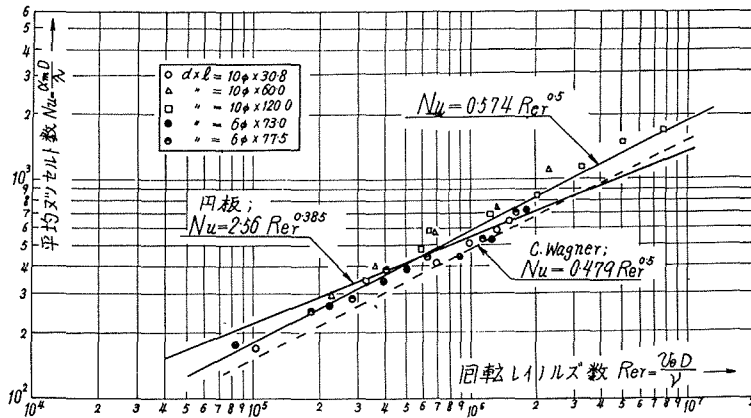
α_m はいずれの場合も $\Delta\theta$ に無関係に一定となり、棒径が少である場合は幾分過大に、長くなるにつれて α_m は低い傾向を持つ。 α_m の図式計算のための誤差はいずれの場合も約 4% 以下であった。

第17図は $Num = \alpha_m D/\lambda$ に対して $Rer = v_\theta D/\nu$ を表わしたもので、 $v_\theta = \omega r$ は周速をあらわす。

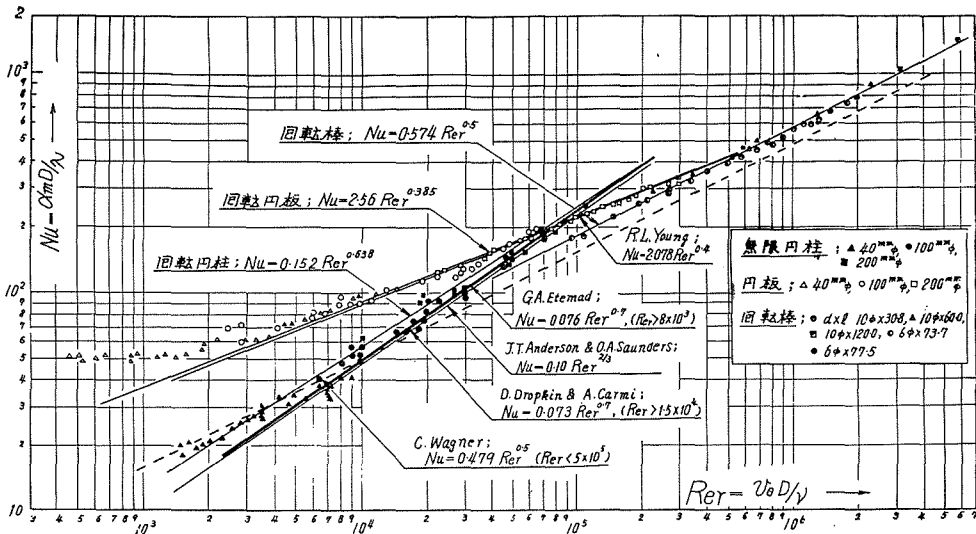
C. Wagner の理論値と同じく $Rer^{0.5}$ に比例する直線で代表することが出来て、

$$Num = 0.574 Rer^{0.5} \quad (7)$$

となり、Wagner の値に対して約 20% 大きい値をしめす。 $d = 6^{mm}\phi$ の場合の方が $10^{mm}\phi$ の場合に比較してやや小さい値となっているが、回転軸径 $D_b^{mm}\phi$ の大小による影響は見られなかった。



第 17 図



第 18 図

3. 結果の比較検討。

以上の回転円柱、円板および棒の場合の結果を比較すれば第18図の如くなる。ただし、 $Num = \alpha_m D / \lambda$ 、レイルズ数 $Rer = v_0 D / \nu$ であり、 v_0 m/s は回転周速をあらわす。(今迄用いた $Rer = 4\pi r^2 \omega / \nu$ とは異なる)

無限円柱の場合は温度差の影響をうけ必ずしも一本の直線で表現することは難かしいが、グラスホフ数 Gr_m を考えに入れた G. A. Etemad の実験式

$$Num = 0.11[(0.5Rer^2 + Gr_m) \times Pr]^{0.25} \quad (8)$$

が低い Rer の範囲でも成立つ⁽⁵⁾。

また、高い Rer の領域はほぼ直線的であり同じく G. A. Etemad の式

$$Num = 0.076 Rer^{0.7}, (Rer > 8 \times 10^3) \quad (9)$$

および、Anderson and Saunders の式⁽¹⁵⁾

$$Num = 0.10 Rer^{2/3} \quad (10)$$

などがよく実験点を表示していることが解る。

いずれも筆者のポテンシャル流とした $Re^{0.5}$ の場合よりも傾斜の大なる直線となり、強制流動領域の熱伝達に近いことを意味する。

また、最近 D. Dropkin and A. Carmi は、

全領域に対して実験式

$$Num = 0.095(0.5Rer^2 + Gr)^{0.35} \quad (11)$$

また、大きい Rer については

$$Num = 0.073 Re^{0.7} \quad (12)$$

を与えているが大きい差異はない⁽⁶⁾。

$$筆者の実験式は、 $Nu = 0.152 Re^{0.638}$ (13)$$

であらわされる。

円板の場合の筆者の実験式は

$$Num = 2.56 Re^{0.385} \quad (14)$$

となるが、R. L. Young の結果は半径を代表長さとして、 $Num = 0.56 (Re \cdot Pr)^{0.40}$ であり⁽⁴⁾、これを書直せば、Dを代表長さとして

$$Num = 2.078 Re^{0.4} \quad (15)$$

となり図の直線で表わされ筆者の場合に比し約1%低い値となる。ただし、 $Pr = \nu/a$ でプラントル数をあらわし空気に対して $Pr = 0.73$ とした。

いずれの場合も実験点をよく表わして居り、C. Wagner の式

$$Num = 0.479 Re^{0.5} \quad (16)$$

とは大分異なる値をしめすが、 Rer が大きくなれば接近した値を持つようになる傾向を持つ。

また棒の場合は筆者の実験式

$$Num = 0.574 Re^{0.5} \quad (17)$$

がよく現象を表わしている。棒の場合は攪乱流となり、 Rer の大きいところでは半径方向流れも活発となるので Num の増大を来すものと考えられる。

結 論

回転円柱、円板および棒が静止電気で回転する場合の表面伝熱率を実験的に求め、回転数により大きく変化することを認めた。

各種の場合を比較するのに対数図表上でヌッセルト数 Num と回転レイノルズ数 Rer なる無次元数で表わし、筆者の結果と最近の各研究者の結果とを比較し、筆者の結果および実験式の妥当性を検討した。これらの結果が各種装置の設計資料となれば幸いである。

最後にこの研究は東北大学棚沢泰教授の御指導により行ったものであることを附記し深く感謝の意をあらわす。また、実験に当りては本学金子祝郎君の援助を得た。ここに謝意を表わす。

(昭和33年9月24日受理)

注，

(1) 泉：日本機械学会論文集，第19巻，第84号，1ページ，昭和28年。

(2) 泉：同上，第20巻，第100号，791ページ，昭和29年。

(3) 泉：同上，第21巻，第109号，658ページ，昭和30年。

- (4) C. Wagner : J. Appl. Phys., vol.19, No.2, 1948, p. 837.
- (5) G. A. Etemad : Trans. A.S.M.E, vol. 77, No.8 , 1955, p. 1283.
- (6) D. Dropkin and A. Carmi ; Trans. A.S.M.E, vol. 79, No.4 , 1947, p.741.
- (7) R. L. Young : Trans. A.S.M.E, vol .78, No.6 , 1956, p. 1163.
- (8) 泉 : 日本機学会論文集, 第20巻, 第92号, 297ページ, 昭和29年.
- (9) 泉 : 同 上 , 第20巻, 第100号, 794ページ, 昭和29年.
- (10) 泉 : 同 上 , 第21巻, 第109号, 661ページ, 昭和30年.
- (11) 宮坂 : 機械の研究, 第7巻, 第3号, 335ページ, 昭和30年.
- (12) Mc Adams ; Heat Transmission, 1942.
- (13) W. Schmidt ; Z.V.D.I, Bd.65, Nr. 441, 1921.
- (14) R. Izumi ; Bull. Yamagata Univ, Engg., vol. 1, No.2 , Oct. 1951, p.407.
- (15) T. Anderson and O. A. Saunders ; Proc. Roy. Soc. London, vol. 217, Series A, 1953, p.552.

泉：回転する物体よりの熱伝達について

On Heat Transmission from Rotating Bodies

Ryotaro IZUMI

Department of Mechanical Engineering,
Yamagata Junior Technical College

The experimental study on heat transmission from rotating bodies, especially on the cylinder and disc, has recently been performed by many researchers.

The author has already treated the experiments with rotating bodies. In the present paper comparison is made between authors' and other researchers' results.

In the case of natural heat convection, ambient air around the rotating body is disturbed and the coefficient of surface heat transmission increases remarkably, according not only to the temperature difference but also to the peripheral velocity of the rotating body.

The experiments are performed as regards three cases, i.e., for the cylinder, disc and the rotating bar, and in each case the relation between the Nusselt's number Num and rotating Reynolds's number Rer is shown graphically.